

流域の貯留量を考慮したダムの洪水調節機能の改善策について

その他（別言語等） のタイトル	IMPROVEMENT OF DAM FLOOD CONTROL BY CONSIDERING THE WATER STORAGE CAPACITY OF A WATERSHED
著者	大橋 和平, 中津川 誠, 臼谷 友秀
雑誌名	水工学論文集
巻	54
ページ	487-492
発行年	2010-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009751

流域の貯留量を考慮した ダムの洪水調節機能の改善策について

IMPROVEMENT OF DAM FLOOD CONTROL BY CONSIDERING THE WATER STORAGE CAPACITY OF A WATERSHED

大橋和平¹・中津川誠²・臼谷友秀³

Kazuhei OHASHI, Makoto NAKATSUGAWA and Tomohide USUTANI

¹ 学生会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

² 正会員 工博 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

³ 正会員 (財) 日本気象協会 北海道支社 (〒064-8555 札幌中央区北 4 条西 23 丁目)

It is necessary to clarify the long-term water balance in an entire watershed, because flood runoff patterns strongly depend on the water storage capacity of the watershed. In snowy regions, the water storage capacity in the soil as well as in the snowpack must be properly evaluated.

This paper estimates the water storage capacity of a watershed using a long-term hydrologic processes model and then examines the relationship between rainfall and inflow to the dam reservoir for heavy rainfall events. We found that the reproducibility of the flood runoff model can be improved by incorporating water storage. Accordingly, quantifying the water storage capacity of a watershed is of practical use for predicting flood runoff and releasing water from a dam reservoir prior to a flood event to improve the dam's flood control capacity.

Key Words : *water storage capacity, long-term hydrologic process, flood runoff, snowy region, water release from the dam reservoir prior to a flood event*

1. はじめに

北海道や東北・北陸地方のような積雪地域では、地球温暖化による融雪期の早まりや、ダム計画上の非洪水期における大雨が懸念されている。融雪期の多目的ダムでは、利水の確保を目指すため貯水位を高く維持しており、そのような時期の大雨によって洪水調節量以上の放流（いわゆるただし書き操作）を行うような事態が起こっている¹⁾。しかしながら、財政・環境上の制約により新規施設の整備が困難な場合、既存施設の機能向上が不可避となる。例えば、治水と利水の安全度の両立を図る多目的ダムでは、洪水調節機能をこれまで以上に引き出すために、流域の貯留効果に基づいた洪水予測に基づく放流操作が戸谷ら²⁾によって提案されている。

本研究は、夏季出水の洪水期や融雪出水を含む非洪水期に異常洪水が発生した場合のダム管理上の問題点を明らかにするとともに、その対応策としてダムの放流操作の工夫によるダム機能の向上方策を検討するものである。研究の背景と目的は次のとおりである。

1) ダムの事前放流により、異常洪水に対しても治水安全度の向上を図れる可能性がある。

2) しかしながら、降雨予測・流入量予測の精度は低く、予測が空振りした場合には、多目的ダムでは利水容量の回復が困難となる。

3) そこで、予測情報に頼らない大胆な事前放流を可能にしたい。もし流域貯留量（土壌中水量や積雪水量）を的確に把握できれば、その違いで今後の洪水流出の動向、無降雨時の貯水量の回復を判断できると考える。

4) そのために、流域貯留量を長期的な水収支の観点から明確化することを目指すこととした。

以上を踏まえ、下記の手順で検討を進めた。

1) 流域貯留量を「長期水循環モデル」から推算した。

2) 流域貯留量に応じ流出率を推定し、降雨・融雪に伴う流入量予測を行った。

3) 上記に基づくダム操作シミュレーションにより、事前放流とただし書き操作回避の実行可能性についての検討を行った。

これらより、異常洪水に対するダムの洪水調節機能の改善に関して、以下のような結果が得られた。

1) 洪水期は土壌貯留量を定量化することで、「汎用性のあるダム流入量予測、事前放流の実施、ただし書き

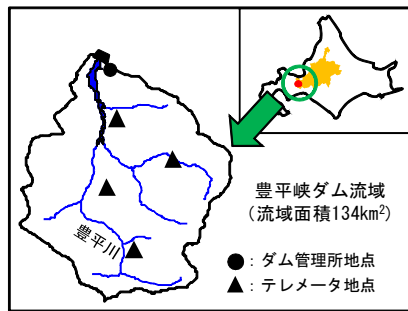


図-1 解析対象（豊平峡ダム）

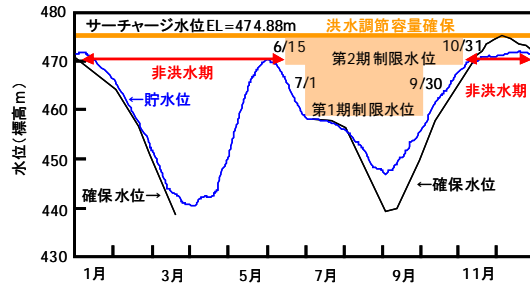


図-2 豊平峡ダムにおける貯水位の変化

操作の回避」に向けての方法論が呈示できた。

- 2) 非洪水期は積雪包蔵水量と土壌貯留量を定量化することで、「汎用性のあるダム流入量予測、事前放流の実施、ただし書き操作の回避」に向けての方法論が呈示できた。

2. 積雪地域の洪水リスク

今回の解析対象としたのは、北海道札幌市の南部に位置する豊平峡ダム（流域面積：134 km²）である（図-1）。積雪期間は11月下旬～翌年5月中旬の約6カ月間で、融雪に伴う増水は4月中旬～5月下旬にみられる。降雪量（雨量換算値）は約1,000 mmで年間降水量の約50%を占め、融雪水は貴重な水資源である。しかし一方では、融雪洪水の原因ともなっている。このダムは洪水調節機能に加え、札幌市の水道水の供給と発電を担う多目的ダムであるが、1973年に運用が開始されて以来3度のただし書き操作が実施された。それはいずれも非洪水期（11月1日～翌年6月14日）に操作が行われた（1988年11月24日、1990年11月20日、2000年5月12日）。図-2は年間をとおした貯水位の推移であり、ただし書き操作が行われた事例に共通することは、利水のために貯水位を高く維持するために洪水調節機能が低い時期ということである。また、融雪が起きる時期には土壌が湿潤であるため、この時期に大雨が降った場合には、流出率は大きくなると見られる。したがって、より安全かつ普遍的な洪水対応のためには、このような洪水規模を定量的に評価して対応策を考えていく必要がある。

しかしながら、現高水計画では非洪水期における洪水規模の確率的な評価はなされておらず、また近年は気候変動による季節外れの大雨が懸念されている状況にある。そのような背景から、非洪水期における確率雨量を対数

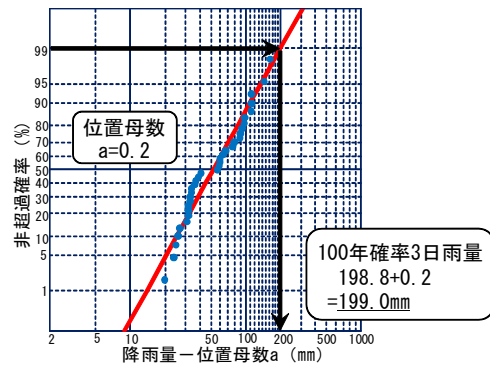


図-3 対数正規確率紙プロット
（非洪水期年最大3日雨量，岩井法，Cunnane Plot）

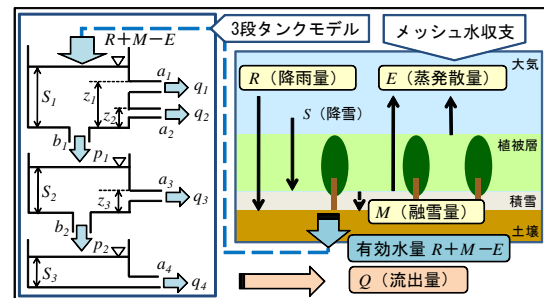


図-4 長期的な水循環計算手法のイメージ

正規分布の岩井法を適用して求めた。使用したデータ³⁾は1973年～2008年の非洪水期における年最大流域平均3日雨量である。その結果、100年確率3日雨量として199 mm（標準最小二乗規準 SLSC, 0.039）という結果が得られた（図-3）。ここで3日雨量を用いたのは、ダム流域の現行計画雨量と同一条件で求めるためであり、ダム流域の現行計画雨量は100年確率3日雨量で349 mmと設定されている。

3. 流域貯留量の評価

(1) 流域貯留量の推算

流域内の土壌や積雪に存在する水量（以下、流域貯留量とする）の推算には、流域スケールで長期的な水収支を表現でき、かつ流出を的確に再現できるような手法が必要となる。そこで、モデル構成としては、長期熱・水収支モデル（口澤ら⁴⁾）と長期流出モデル（中津川ら⁵⁾）を組み合わせた長期水循環モデルを用いた（図-4）。

長期熱・水収支モデルによる計算では、約1km四方のメッシュ毎に日単位の気象・水文データから、水文諸量（降雨、降雪、積雪、融雪、蒸発散）の推定を行った。なお、この計算では基本的にダム管理用のルーチンデータ（降水量、風速、日射量、日照時間、湿度、気温、積雪深など）を使用している。次に、メッシュ毎の降水量、融雪量、蒸発散量を流域全体にわたってランピングし、蒸発散量を差引いた正味の降雨量、融雪量を、長期流出モデルへの入力値として、（日平均）流出量およびタンク貯留量を推算した。このタンク貯留量を土壌貯留量とみなす。長期流出モデルは、表面流出、中間流出、地下水

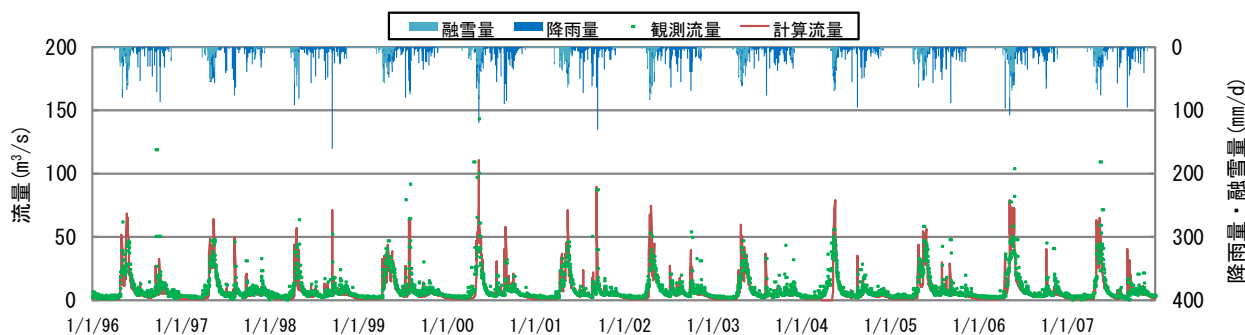


図-5 長期水循環計算の結果（豊平峡ダム流域，1996. 1. 1～2007. 12. 31）

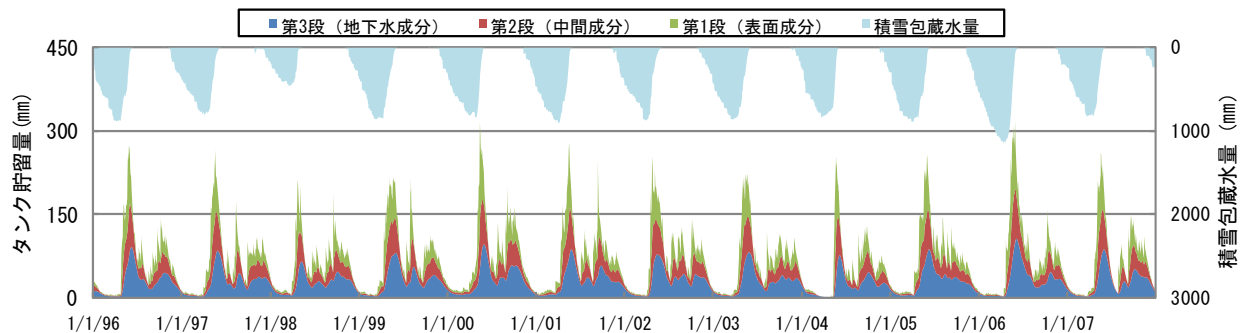


図-6 流域貯留量の推移（豊平峡ダム流域，1996. 1. 1～2007. 12. 31）

流出の成分毎に流出量と貯留量を再現できる3段タンクモデルを採用し，中津川ら⁵⁾が同定したパラメータを用いた。

1996年～2007年の12年間にわたる推定結果を図-5～図-6に示す。融雪期も含む長期間の流出を妥当に再現していることがわかる。このようにして，土壤貯留量および積雪包蔵水量からなる流域貯留量を把握することは，洪水調節の前倒し（事前放流）といったダム操作への活用が期待できると考えられる。

(2) 土壤貯留量と流出率の関係

土壤中の水量の違いが流出量にどのような影響をもたらすかをみるために，1996年～2007年の洪水期（6月15日～10月31日）において2日間総降雨量が100mm以上の20事例について，土壤貯留量と流出率の関係を解析した。ここで，土壤貯留量とは前述した長期流出計算による洪水事例対象日の前日の推算値，流出率とは対象とした2日間の総観測流出量を総観測降雨量で除した値と定義する。期間を2日間と設定したのは，降雨1イベントが2

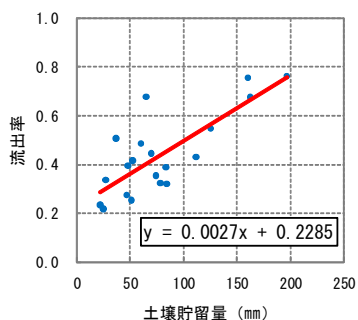


図-7 土壤貯留量と流出率の関係（豊平峡ダム流域）

日間に収まると見なされるためである。図-7に解析結果を示す。大雨が降ったときの豊平峡ダム流域の流出率は，土壤貯留量が50mm程度の場合には約0.4，土壤がより湿潤な状態の200mm程度の場合には約0.8というように，土壤貯留量が大きくなるにつれて流出率が大きくなる傾向が得られた。すなわち，前日までの土壤貯留量を把握しておくで，その後の洪水流出の流出率を推計でき洪水予測の点で有益であると考えられる。

4. 流域貯留量を考慮した洪水流出の再現

(1) 貯留関数法による短期流出計算

ここでは長期的に推算した土壤貯留量の情報を用いることは，その後の短期的な洪水流出計算で役立つが，洪水流出の再現を行うことで検討する。再現洪水事例として，初期（洪水計算対象日の前日）の土壤貯留量が異なる4事例を取り上げる（表-1）。短期流出モデルには，水収支を明確にしつつ非線形性の強い洪水流出をあらわすために2段タンク型貯留関数法⁶⁾を適用した。このモデルは，全流出過程を表面・中間流出と地下水流出の2成分に分離し，両者を下記に示すように別々の貯留関数によって表わす。

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}q_1^{p_1} + k_{12} \frac{d}{dt}(q_1^{p_2}) \\ \frac{ds_1}{dt} = r_e - q_1 - f_1, f_1 = k_{13}q_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$s_2 = k_{21}q_2 + k_{22} \frac{dq_2}{dt}, \quad \frac{ds_2}{dt} = f_1 - q_2 \quad (2)$$

ここで， s ：貯留量（mm）， q ：流出高（mm/h）， f ：浸透量

(mm/h), r_e : 有効雨量 (mm/h), k および p : モデルパラメータ, 添え字の 1 および 2 は各々表面・中間流出および地下水流出を意味する。

土壌の貯留効果を流出計算に与える方法としては, 長期流出計算で推算された計算対象日の前日の土壌貯留量を初期条件として, 図-7 に基づく流出率を降雨量に乘じることで与えた。すなわち, 土壌貯留量に応じた有効雨量を与えることを意味する。また計算開始後は, 単位時間毎に実降雨量と流出量の差引きから貯留量を更新し, 図-7 の関係からそれに見合う流出率を与えた。これは, 貯留状態が降雨によって時々刻々と変化し続ける現象を考慮するためである。また事例 3 および事例 4 は融雪を伴った洪水であるため, 積雪量を考慮した計算を行って

いる。計算には前述した長期熱・水収支モデルで推算した積雪包蔵水量や積雪深などを用い, 臼谷ら⁷⁾の融雪流出モデルを適用し, 融雪・積雪浸透といった過程を踏まえた流出再現を行った。この場合の流出率は土壌が湿潤状態とみなし 1.0 として与えた。なお, 流出モデル (2 段タンク型貯留関数法) のパラメータは臼谷ら⁷⁾が同定した値を基本とし, 再現性が向上するように試行錯誤により決定し, 全ての事例で共通の値を使用した。

(2) 流出計算の再現結果と考察

洪水流出の再現結果を図-8 に示す。各事例の流出パターンを共通のパラメータで洪水期も非洪水期もおおむね妥当に再現できたと見なせる。また, 立ち上がりの流出量の違いが的確に表現できていることに注目できる。つまり, 洪水予測がその局面だけを抽出して行うものがほとんどであったが, 長期的に流域貯留量を把握することは短期イベントの洪水流出の汎用的予測に有効であると考えられる。なお, 事例 1 では急激な流出量の増加にモデルが十分に追従できていないように見られる。このような非線形的挙動については今後検討を要する。

5. ダムの洪水調節機能の評価

本章では, 100 年確率雨量を基にした雨量と前章の流出モデルにより定量化した洪水規模に対するダムの対応シミュレートを行い, ダムの洪水調節機能の改善策について検討を行う。

豊平峡ダムの洪水調節は一定率一定量放流方式が採用されている。流入量が $60 \text{ m}^3/\text{s}$ (洪水量) を超えると洪水調節に入り, $60 \text{ m}^3/\text{s}$ から $820 \text{ m}^3/\text{s}$ までの間は, 次式によって放流量が算定される (定率操作)。

$$q_{out} = (q_{in} - 60) \times 0.105 + 60 \quad (3)$$

ここで, q_{out} : 放流量 (m^3/s), q_{in} : 流入量 (m^3/s) である。

次いで, 流入量が $820 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えると, $q_{out} = 140 \text{ m}^3/\text{s}$ の定量操作に移行する。このような洪水調節を行ったとしても, 貯水位がただし書き操作水位 (472.58 m) を超え, さらにサーチャージ水位 (474.88 m) に到達することが予想された時点でただし書き操作に移る。

本研究では, 上記したダムの洪水調節に関する操作ルールを定式化 (プログラム化) し解析を進めた (以下, ダム放流操作モデルとする)。この処理は貯水位・流入量に応じて放流量を算定するものであり, モデル化にあたっては, 操作規則・操作細則・ただし書き操作要領を if-then 形式の組み合わせで定式化した。放流量の計算時間間隔は, ダム操作の実態から 10 分単位とした。なお, 流入量は 1 時間間隔で計算されることから, その値を直線で補間して 10 分間隔の値に変換した上で, ここでのプログラムに入力した。

表-1 再現洪水事例 (豊平峡ダム流域)

事例	再現期間	再現時間 (hr)	観測雨量 (mm)	観測流出高 (mm)	初期貯留量 (mm)
1	2005/9/6~9/8	72	139	57	51
2	1999/8/1~8/3	72	117	116	196
3	2000/5/11~5/13	72	110	184	208
4	2006/5/27~5/29	72	116	144	283

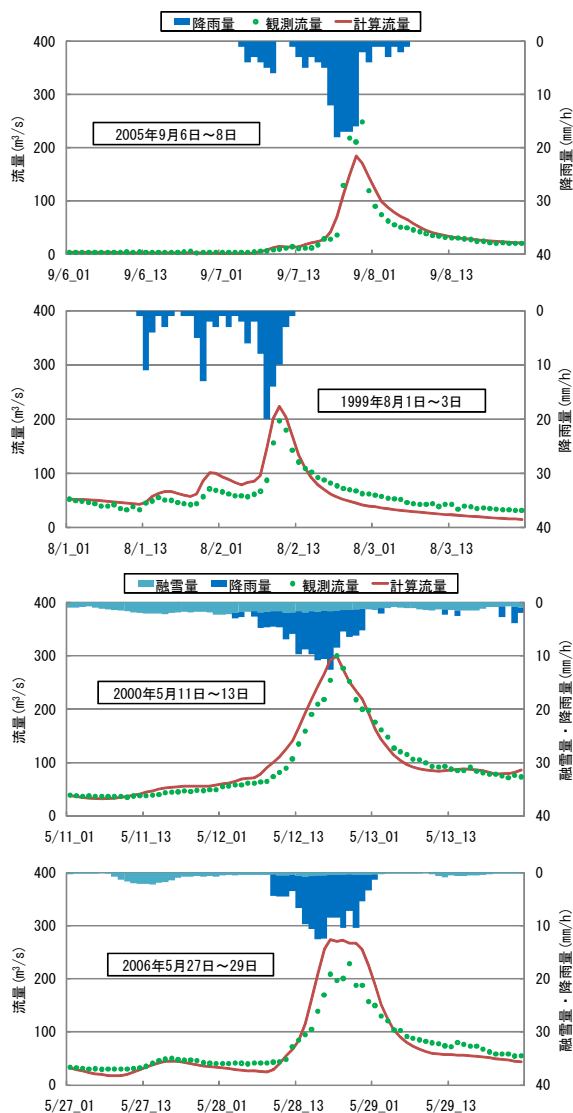


図-8 流出計算の再現結果
(上から順に, 事例 1, 事例 2, 事例 3, 事例 4)

表-2 洪水期の洪水規模の計算ケース

ケース	初期貯留量 (mm)	初期流出率	3日降雨量 (mm)	最大流入量 (m³/s)
1	50	0.36	349	772
2	200	0.77	349	805

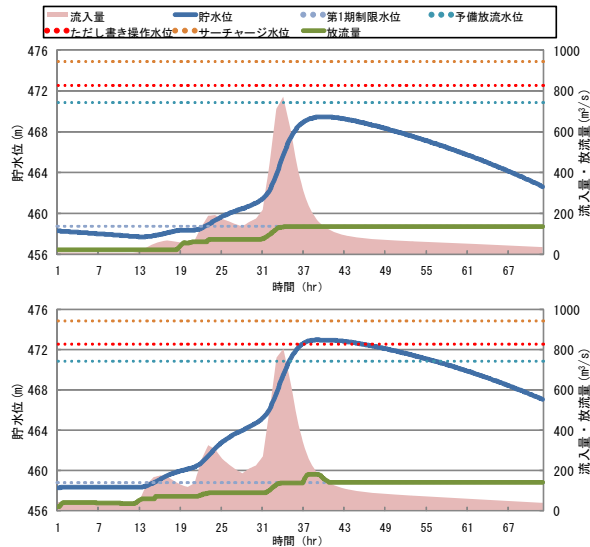
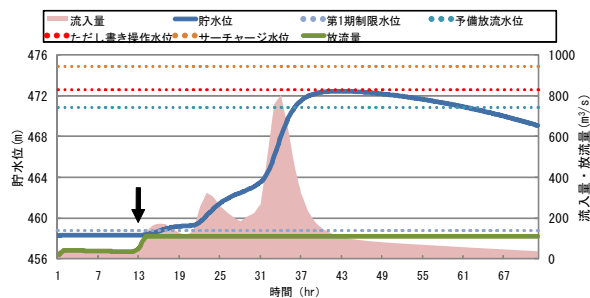
図-9 通常の操作による対応シミュレーション結果
(上段：ケース 1, 下段：ケース 2)図-10 事前放流シミュレーション結果
(ケース 2, 図中の矢印は基準時刻の 24 時間前)

表-3 ただし書き操作を回避するための事前放流量

ケース	基準時刻	24時間前から 放流開始	12時間前から 放流開始	6時間前から 放流開始
2	図-9 (下段) の37時間目	110 m³/s	135 m³/s	165 m³/s

(1) 洪水期の洪水

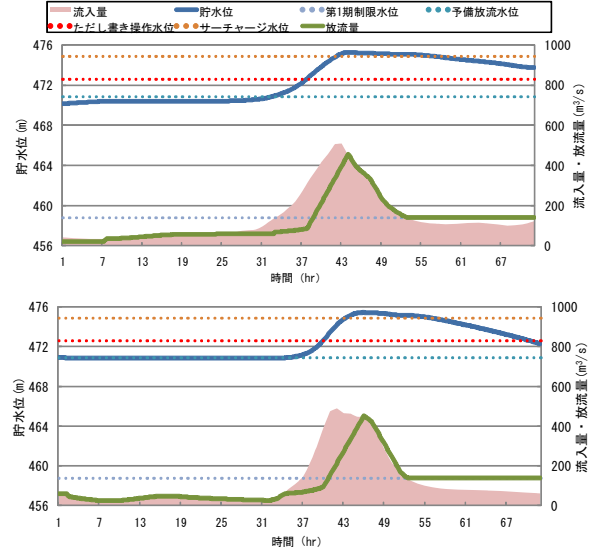
洪水期における洪水規模計算は、初期の土壌貯留量が異なる 2 パターンを想定した (表-2)。雨量には現行計画 3 日雨量 349 mm を用い、前章の事例 2 の 3 日雨量 117 mm を引伸ばして (引伸ばし率 2.98) ハイエットを設定した。それから流出計算より得られたハイドログラフをダム放流操作モデルに入力し、ダムの貯水位と放流量の対応シミュレーション結果 (図-9) を得た。なお、初期貯水位は第 1 期制限水位 (458.78m, 図-2 参照) とした。

ケース 1 では、流入をダムに貯め込み、一定率一定量の放流操作によって洪水調節できていることがわかる。一方で、ケース 2 では貯水位がただし書き操作水位に到達している。これは、同じ降雨であっても土壌の貯留状態によって流出特性が変化するため、洪水規模の大きさが異なることを意味していると言える。

ここでケース 2 について、ただし書き操作を回避する

表-4 非洪水期の洪水規模の計算ケース

ケース	引伸ばし率	3日降雨量 (mm)	3日融雪量 (mm)	最大流入量 (m³/s)
3	1.81	199	108	509
4	1.72	199	44	491

図-11 通常の操作による対応シミュレーション結果
(上段：ケース 3, 下段：ケース 4)

ための事前放流について検討する。ただし書き操作水位に到達した時刻を事前放流開始の基準時刻とし、その 24 時間前、12 時間前および 6 時間前から事前放流を行う場合、どの程度の放流量であればただし書き操作を回避できるのかをシミュレートした。この放流操作は操作規則とは異なり、貯水位が制限水位より低い時点から洪水調節を前倒して行うものである。図-10 によれば、基準時刻の 24 時間前から洪水調節量を通常操作よりも増量させた 110m³/s を放流することによってただし書き操作を回避できるとわかる。シミュレーション結果の一覧は表-3 に示す。これより、洪水期において計画規模で想定される洪水規模に対し、適切な事前放流を行えば治水安全度の向上は可能であると考えられる。ただし、的確な雨量予測や事前放流量が下流に被害を与えない量 (無害流量) であるかなどの検討が不可欠である。

(2) 非洪水期の洪水

非洪水期の洪水規模計算は、前章の事例 3 および事例 4 を基に、融雪を伴った大雨を 2 パターン想定した (表-4)。ハイエットは各事例で観測 3 日雨量を図-3 で求めた 100 年確率 3 日雨量 199 mm に引伸ばした降雨量と、前章で推算した融雪量を合算して設定した。これより前節と同様に流出計算でハイドログラフを求め、ダム放流操作モデルに入力し得られたダムの貯水位と放流量の対応シミュレーション結果を図-11 に示す。なお、初期貯水位は各事例の計算対象日前日の日平均貯水位³⁾を与えた。

その結果、両ケースともに貯水位がただし書き操作水位だけでなく、サーチャージ水位をも超過していることがわかる。これは非洪水期の多目的ダムでは、利水の確

表-5 ただし書き操作を回避するための事前放流量

ケース	基準時刻	24時間前から開始した場合の事前放流量 (m^3/s)	必要な事前放流量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	流域貯留量 (うち積雪包蔵水量) ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
3	図-11 (上段)の38時間目	180	15.6	96.6 (68.6, 71%)
4	図-11 (下段)の40時間目	165	14.3	60.2 (22.2, 37%)

保のために貯水位を高く維持することによって、洪水調節を予備放流水位 (470.88 m) 以上の限られた容量を使って行わなければならない管理が要求されており、洪水調節機能がもともと低いためである。そこで、非洪水期においては、貯水位が予備放流水位以下の時点から一時的に利水容量の一部を用いる事前放流を開始することによってただし書き操作を回避することが考えられる。

前節のケース 2 と同様に、ただし書き操作を回避するために必要な事前放流量を推計した。表-5 によると、両ケースともに基準時刻の 24 時間前から事前放流を開始した場合でも、通常操作の無害放流量 ($60 \text{ m}^3/\text{s}$) の約 3 倍もの流量を放流しなければならない結果となった。一方で、必要とされる事前放流量より多くの流域貯留量があることも推定されており、大胆な事前放流も可能と言える。すなわち、流域貯留量を把握しておくことで今後流入してくる水量の判断材料となり、予測が空振りした場合でも利水容量の回復判断に活用できると考えられる。

次に、流入量が $820 \text{ m}^3/\text{s}$ を超えない状況にあっても、事前放流量を現況規則で洪水調節機能を最大限使ったといえる計画最大放流量 $140 \text{ m}^3/\text{s}$ とした場合に、基準時刻の何時間前から放流を開始しなければならないかを推計した。その結果、ケース 3 では基準時刻の 36 時間前、ケース 4 では同 31 時間前から放流を開始しなければただし書き操作は回避できないという結果となった。

図-12 は、ケース 3 において事前放流量を $140 \text{ m}^3/\text{s}$ に固定し放流開始時点 (基準時刻の 24 時間前) の貯水位を変えて貯水位を計算した結果である。この図によれば、放流量を $140 \text{ m}^3/\text{s}$ に設定すると、放流開始時の貯水位は 467.00 m (現状予備放流水位 470.88 m よりさらに -3.88 m) まで下げることが必要と読み取れる。

以上より、非洪水期に想定される融雪洪水に対して、現況より無害流量 (洪水調節開始前流量) の増量だけでなく、予備放流水位 (洪水調節開始水位) の見直しを必要とする結果も示唆された。その場合、利水容量の確保も不可欠な命題となり、ダム容量の再編や複数ダムでの連携操作など総合的な水管理方策の検討が必要となる。

6. まとめ

本報告において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 積雪地域のダム流域を対象に、十数年にわたり流域の流域貯留量が再現された。
- 2) 洪水期 (夏季出水期) は土壌貯留量を定量化することで、「汎用性のあるダム流入量予測、事前放流の実施、ただし書き操作の回避」に向けての方法論が呈

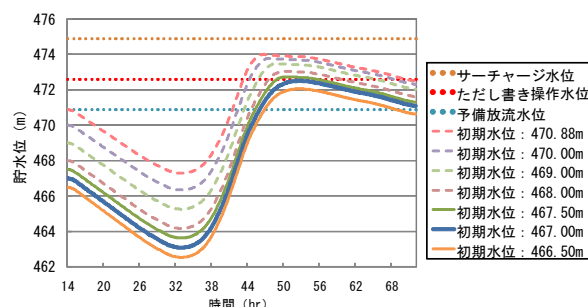


図-12 初期水位の設定の違いによる貯水位の変化 (ケース 3)

示できた。

- 3) 非洪水期 (融雪出水期) は積雪包蔵水量と土壌貯留量を定量化することで、「汎用性のあるダム流入量予測、事前放流の実施、ただし書き操作の回避」に向けての方法論が呈示できた。
- 4) 流域貯留量の把握によって、大胆な事前放流が可能となり、また利水容量の回復も判断できる可能性を示した。

以上のように、積雪地域では洪水期・非洪水期の異常洪水に対処するためにもダムの機能向上が不可欠であると考えられる。このほかにも、降雨予測の活用や事前放流量の増量、利水容量の確実な確保などの課題を克服していく必要がある。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、石狩川開発建設部豊平川ダム統合管理事務所からデータ提供等で協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 中津川誠, 星 清: 融雪期に豪雨が相俟って生起する出水の予測について, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp.453-458, 2001.
- 2) 戸谷英雄, 秋葉雅章, 宮本守, 山田正, 吉川秀夫: ダム流域における洪水流出特性から可能となる新しい放流方法の提案, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.27-40, 2006.
- 3) 国土交通省 水文水質データベース, <http://www1.river.go.jp/>
- 4) 口澤寿, 中津川誠: 熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散量の推定, 北海道開発土木研究所月報, No.588, pp.19-38, 2002.
- 5) 中津川誠, 濱原能成, 星 清: 積雪変化を考慮した長期流出計算, 水工学論文集, 第 47 巻, pp.157-162, 2003.
- 6) 財団法人 北海道河川防災研究センター・研究所: 実践流出解析ゼミ (講義テキスト編), 第 10 章, 2006.
- 7) 臼谷友秀, 中津川誠, 星 清: 積雪浸透を考慮した実用的融雪流出モデルの開発, 水文・水資源学会誌, Vol.20, No.2, pp.93-105, 2007.
- 8) 臼谷友秀, 中津川誠, 清治真人: 予測情報に基づいた積雪地域のダム放流操作の考察, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.469-474, 2009.

(2009. 9. 30 受付)